中亚草地NPP时空动态及其驱动因素研究

张赟鑫[1,2,3]， 郝海超[4,5]， 范连连[1]， 李耀明[1]， 张仁平[6,7]， 李凯辉[1,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所丝路绿色发展研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 中国科学院巴音布鲁克草原生态系统研究站，新疆 巴音布鲁克 841314；4. 华东师范大学地理科学学院，上海 200062；5. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室，上海 200062；6. 新疆大学生态与环境学院，新疆 乌鲁木齐 830046；7. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046）

摘　要：基于CASA模型和Miami模型计算中亚五国（哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦）的草地净初级生产力（NPP），旨在探究2001—2019年中亚草地NPP的时空动态及其驱动因素。结果表明：2001—2019年中亚地区草地的实际净初级生产力（ANPP）均值为118.9 g C·m^{-2}·a^{-1}；在空间尺度上，平原地区的草地ANPP随纬度增加而呈现由南到北逐渐增加的趋势，从平原到山地草地ANPP随海拔升高呈现明显的增加趋势；在时间尺度上，ANPP总体呈现不显著的增长趋势，近60%区域的草地ANPP未来的变化趋势将与过去相反，但不显著；在中亚草地ANPP增加的区域，人类活动占主导地位；在中亚草地ANPP降低的区域，气候变化是主要驱动力；中亚草地的ANPP与降水呈现显著正相关的区域达到67.8%，温度与中亚草地ANPP的变化关系不显著，降水是影响中亚草地ANPP变化的主要气候因子。

关键词：NPP；中亚地区；草地；变化趋势；气候变化；人类活动

亚洲中部干旱区是全球最大的非地带性干旱区之一，中亚五国（哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦、乌兹别克斯坦）是其中十分重要的组成部分[1]。中亚地区地表植被稀疏，水资源严重匮乏[2]，全球变暖背景下，气候变化剧烈，生态系统脆弱[3]。20世纪80年代至今，中亚地区气温显著上升，降水的地域性差异也在变强[4-5]。在过去半个世纪，气候变化剧烈，甚至出现极端气候，包括中亚地区在内的全球各地的干旱现象在不断增加[6]。近30 a，中亚部分地区生态环境退化，干旱、草原退化和湖泊萎缩等现象加剧，使中亚地区成为亚洲乃至世界上生态恶化最严重的区域之一[7]。特别是21世纪以来，中亚地区生态环境恶化较为严重，在国际社会上引起高度关注[8-9]。

草地是一种可再生资源，在全球陆地植被中占有较大的面积，具有维持全球生态平衡的重要价值，也是畜牧业的生产资料和经营对象，同时，草地作为陆地生态系统中最重要的组成部分之一，对全球的碳平衡具有重要的作用[10-11]。气候变化和人类活动的不利影响，将会导致草地生态系统环境恶化，进而导致草地退化[12]。草地在中亚土地利用类型中占有绝对优势[1]，在全球碳循环、区域生态安全和社会稳定中发挥着关键作用[13]。

植被净初级生产力（NPP）是指在单位时间和单位面积内，绿色植物所积累的有机质和干物质总量，对应了植被的自然生产能力，在调节全球碳循环与生态过程环节中发挥了重要作用[14-15]。草地生态系统的净初级生产力及其变化是衡量对气候因子高度敏感的生态系统功能的重要指标，同时草地NPP对非气候因素的变化也会做出响应[16]。

脆弱的中亚草地生态系统容易受到人类活动和全球气候变化的调控。过去几十年，气候变化和人类活动对中亚草地的影响在加剧。研究表明，中亚地区的气温以0.4 ℃·(10a)$^{-1}$的速度在上升，随之而来的就是干旱程度加剧[17]，从而加速草地退化和荒漠化过程[18]。同时，中亚的体制和社会经济活动

收稿日期：2021-07-20； **修订日期：**2022-01-09
基金项目：中国科学院战略性先导科技专项A类项目（XDA20050104）；王宽诚教育基金会（中亚咸海生态与环境修复国际研究团队）资助
作者简介：张赟鑫（1995-），男，硕士研究生，主要从事草地生态学研究. E-mail: 516394631@qq.com
通讯作者：李凯辉. E-mail: likh@ms.xjb.ac.cn

也发生了深刻的变化，伴随1991年苏联的解体[19]，该地区的草原生态系统也更容易受到不同程度的人为干扰。例如，放牧活动的加剧导致草原严重退化，大量弃耕地被改造成草原。在这种背景下，中亚已经成为理解气候和人类因素对草原生态系统影响的热点地区[20]。

在"一带一路"倡议的大背景下，厘清气候变化和人类活动对中亚草地的作用成了亟需解决的问题。在以往的研究中，缺少定量的方法评价中亚草地生产力的驱动机制，讨论人为因素对草地生产力的影响也较少。因此，需要一种定量方法来评估气候因子以及人类活动因素对中亚草地生产力的相对影响。本研究模拟中亚草地的净初级生产力，目的是探究近20 a中亚草地NPP变化格局，并且预测中亚草地NPP未来变化趋势，同时定量分析气候变化和人类活动在中亚草地生产力变化过程中的作用。本文将为了解中亚地区草地生态系统动态提供有效信息，对未来草地资源的合理利用提供参考。

1 材料与方法

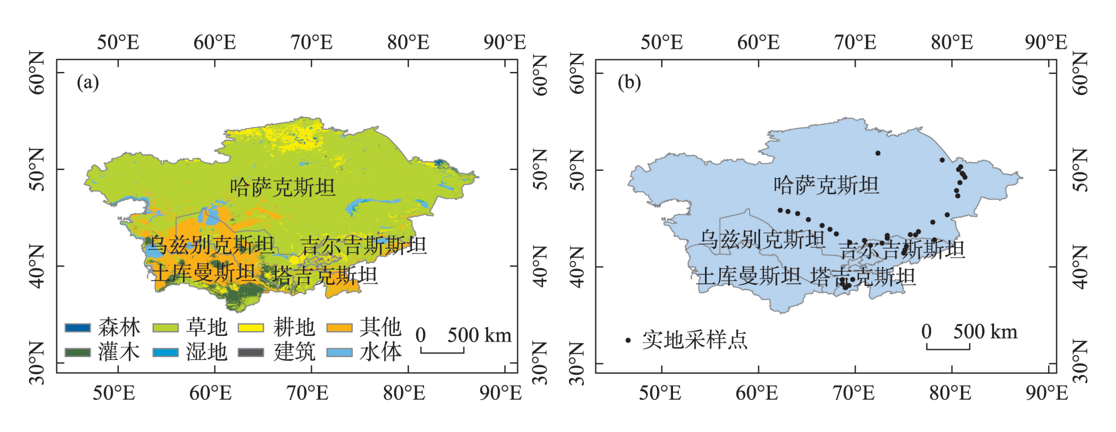
1.1 研究区概况

中亚地处欧亚大陆腹地，东西横跨46°29′47″~87°18′55″E，南北纵跨35°07′43″~55°26′28″N，西到里海和伏尔加河，东与中国接壤，北到西伯利亚大草原，南与伊朗、阿富汗交界。总面积约4.0×10^6 km^2。按行政区划分有5个国家，即哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦。中亚西部是图兰低地，其北部与东北部是图尔盖台地和哈萨克斯坦丘陵，东部和东南部是天山山脉和帕米尔高原。中亚地区海拔自西部平原向东部山区逐渐升高，表现为东南高、西北低，主要地形为平原、山地及丘陵，沙漠面积广。主要气候类型为温带大陆性气候，包括温带草原、高原山地及温带荒漠气候。中亚地区年均降水相对稀少，不同地域的年均降水量相差大；日照充足，气温日较差很大，从多年平均气温分布来看，西部和南部较高。20世纪80年代至今，中亚地区气温显著上升，但降水存在较强的地域性差异[21]。中亚的主要植被类型为林地、草地和耕地，草地分布最广泛，面积也相对较大。

1.2 数据来源

1.2.1 NPP、NDVI及土地利用数据 利用MOD13A1产品作为NDVI的源数据，空间分辨率为500 m×500 m，时间分辨率为16 d，采用最大化合成法（maximum value composite，MVC）将源数据的分辨率合成为30 d。利用MOD17A3H产品作为NPP的验证数据，空间分辨率为500 m×500 m。MCD12Q1产品作为土地利用数据，空间分辨率为500 m×500 m，参考国际地圈生物圈计划（International Geobiosphere Programme，IGBP）的土地分类体系，将中亚地区的土地利用类型重新归类为：耕地、草地、荒漠、森林、灌木、建筑用地、水体和草地（图1a，其中草地包括IGBP分类系统中的典型草原和稀疏草原）。

1.2.2 气象数据 气象数据选用英国East Anglia大学Climatic Research Unit（CRU）提供的2001—2019年的降水和气温格点数据，空间分辨率0.5°×0.5°（约50 km），利用ArcGIS软件将其重采样至500 m×



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2016)1666号，对底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况及采样点示意图

Fig. 1 Overview of study area and sampling point

500 m。CRU通过整合已有的若干个知名数据库，重建了一套覆盖完整的地表气候要素数据集，覆盖全球陆地的9个地表变量，具有较高可信度。陈发虎等[22]也认为，在中亚地区1930年以后的CRU资料可靠性和适用性较高。

1.2.3 实测数据 所使用的实测数据来自2018—2019年6—7月，分别在哈萨克斯坦、塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦采集的草地植被生物量数据。选取样地共40个（图1b），每个样地布设5个1 m×1 m的样方，收取每个样方的地上生物量（对于草地中的灌丛，选取当年的新枝和叶片作为地上生物量），求均值得到每个样地的生物量。地下生物量参考马安娜等[23]对中国草地植被地上和地下生物量的关系的研究求得。

1.3 研究方法

1.3.1 NPP模拟 本研究定义了3种类型NPP，分别是由CASA模型计算的ANPP（人类活动与气候因素共同驱动的NPP），Miami模型模拟的气候因素驱动的潜在净初级生产力（PNPP），以及人类活动占用的净初级生产力（HNPP）。

采用CASA模型来模拟中亚地区的草地ANPP（实际净初级生产力），该模型中植被NPP由光合有效辐射（APAR）和实际光能利用率（ε）决定：

$$\mathrm{ANPP}(x,t)=\mathrm{APAR}(x,t)\times\varepsilon(x,t) \tag{1}$$

APAR的计算公式如下：

$$\mathrm{APAR}(x,t)=\mathrm{SOL}(x,t)\times\mathrm{FPAR}(x,t)\times0.5 \tag{2}$$

式中：SOL(x,t)表示太阳总辐射量；FPAR(x,t)表示植被层对入射光合有效辐射的吸收比例，可以通过归一化植被指数（NDVI）求得，常数0.5表示植被所能利用的太阳有效辐射的比例。

光能利用率的计算公式如下：

$$\varepsilon(x,t)=T_{\varepsilon1}(x,t)\times T_{\varepsilon2}(x,t)\times W_{\varepsilon}(x,t)\times\varepsilon_{\max} \tag{3}$$

式中：$T_{\varepsilon1}(x,t)$和$T_{\varepsilon2}(x,t)$表示低温和高温的胁迫系数；$W_{\varepsilon}(x,t)$为水分胁迫系数；$\varepsilon_{\max}$是理想条件下的最大光能利用率。

采用Miami模型模拟中亚草地的PNPP。Miami模型根据温度（T）和降水（P）资料建立，广泛用于计算大尺度范围的气候驱动的草地的潜在净初级生产力（PNPP）[16]，计算公式如下：

$$\mathrm{PNPP}=\min\left(\mathrm{NPP}_T,\ \mathrm{NPP}_P\right) \tag{4}$$

$$\mathrm{NPP}_T=3000/\left(1+\mathrm{e}^{1.315-0.119T}\right) \tag{5}$$

$$\mathrm{NPP}_P=3000\times\left(1-\mathrm{e}^{-0.000664P}\right) \tag{6}$$

式中：NPP_T和NPP_P分别表示温度和降水引起的草地NPP。

HNPP为PNPP和ANPP的差值：

$$\mathrm{HNPP}=\mathrm{PNPP}-\mathrm{ANPP} \tag{7}$$

1.3.2 NPP的验证 基于实测数据开展CASA模型模拟结果的验证工作，需要将地面实测生物量转换为NPP。公式如下：

$$\mathrm{NPP}_{实测}=(AGB+BGB)\times\mathrm{turnover} \tag{8}$$

式中：AGB为地上生物量；BGB为地下生物量；turnover是将单位面积生物量数据换算为实测NPP值的转换系数，本研究参考Chen等[24]的研究，取固定值0.5。

1.3.3 NPP的趋势分析 采用基于最小二乘法的线性回归分析计算中亚地区草地ANPP 2001—2019年年际变化趋势，并利用MATLAB软件计算NPP的线性回归系数：

$$Slope=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}(i\times\mathrm{NPP}_i)-\sum_{i=1}^{n}i\times\sum_{i=1}^{n}\mathrm{NPP}_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{9}$$

式中：$Slope$是趋势线的线性回归系数，当$Slope>0$时，说明草地NPP在n年内的变化趋势是增加的，反之则减少。

1.3.4 NPP趋势的持续性分析 采用Hurst指数分析中亚草地ANPP趋势的持续性，通过MATLAB软件实现。

均值序列：

$$\xi(\tau)=\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}\xi(t),\quad t=1,\ 2,\ 3,\ \cdots \tag{10}$$

累计离差：

$$X(t,\tau)=\sum_{t=1}^{\tau}\left[\xi(t)-\xi(\tau)\right],\ 1\leqslant t\leqslant\tau \tag{11}$$

极差：

$$R(\tau)=\max_{1\leqslant t\leqslant\tau}X(t,\tau)-\min_{1\leqslant t\leqslant\tau}X(t,\tau),\quad \tau=1,\ 2,\ 3,\ \cdots \tag{12}$$

标准差：

$$S(\tau)=\left\{\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}\left[\xi(t)-\xi(\tau)\right]^2\right\}^{\frac{1}{2}},\quad \tau=1,\ 2,\ 3,\ \cdots \tag{13}$$

定义$R/S=R(\tau)/S(\tau)$，若$R/S\propto\tau^{H}$，说明分析的时间序列符合Hurst指数的定义，H称为Hurst指数，范围为0~1。若$0.5<H<1$，表明所研究的时间序列变化

状态与过去一致，即正向持续；若0<H<0.5，表明所研究时间序列的变化状态与过去相反，即反向持续。

1.3.5 NPP与温度、降水的相关性分析　利用Pearson相关关系法对中亚草地ANPP和中亚地区年均温与年降水之间的相关关系进行了分析，并通过MATLAB软件实现。

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \tag{14}$$

式中：n为时间序列长度；x_i和y_i分别表示第i年的ANPP值和第i年的年均温或年降水；$\bar{x}$和$\bar{y}$分别表示ANPP的多年平均值和多年平均气温或多年平均降水；相关系数R的绝对值的范围为0~1。

2　结果与分析

2.1　模型检验

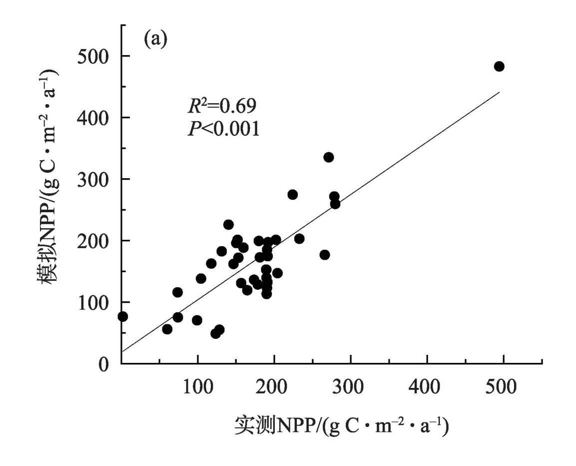
利用2018—2019年哈萨克斯坦、塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦的生长季实测NPP，对CASA模型模拟的草地NPP进行验证(图2a)，采用的实测数据样方分布范围广，涵盖多种草地类型，监测时间也较为一致，可以较好地代表中亚地区草地净初级生产力。实测NPP和CASA模型模拟NPP决定系数R^2为0.69(P<0.001)，表明CASA模型是适用于估算当地草地NPP。

为了进一步评估CASA模型对中亚地区NPP的模拟精度，利用ArcGIS 10.2的渔网工具，在研究区内均匀生成500个采样点，提取2001—2019年研究区内CASA模型模拟NPP值和MODIS NPP值，用于验证分析(图2b)。验证结果表明，MODIS NPP数值略高于CASA模型模拟NPP，二者拟合程度较高(R^2=0.79，P<0.001)。

2.2　中亚草地NPP时空变化特征及变化趋势

在海拔和气候的影响下，整个区域的ANPP具有明显的空间异质性(图3)。模型模拟得到，2001—2019年，中亚地区草地的年均ANPP为118.9 g C·m^{-2}·a^{-1}。草地ANPP最高和最低的年份分别为2002年(135.5 g C·m^{-2}·a^{-1})和2008年(97.6 g C·m^{-2}·a^{-1})。分析得出，中亚草地的平均ANPP的低值区面积(0~60 g C·m^{-2}·a^{-1})占中亚地区草地面积的19.2%，主要分布区域为里海东部海岸线经哈萨克斯坦南部至巴尔喀什湖；高值区面积(>240 g C·m^{-2}·a^{-1})占中亚地区草地面积的6.0%，主要分布在哈萨克斯坦北部草原、西天山和帕米尔高原西部。中亚地区的年均草地ANPP大部分集中于60~240 g C·m^{-2}·a^{-1}之间。从空间分布来看，平原地区的草地ANPP随纬度增加而呈现由南到北逐渐增加的趋势，从平原到山地草地ANPP随海拔升高呈现明显的增加趋势。

吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦都是典型的山地国家，草地面积占两国国土总面积的比例约60%。2001—2019年，两国的年均草地ANPP高达158.52 g C·m^{-2}·a^{-1}，且呈现低海拔到高海拔逐渐增加的趋势。哈萨克斯坦国土面积占中亚五国总面积的比例超过75%，境内土地利用类型较为丰富，草地在土地利用类型中占有绝对优势，该国的草地年均实际净初级生产力为115.93 g C·m^{-2}·a^{-1}，且呈现ANPP随纬度升高逐渐增加的趋势。乌兹别克斯坦和土



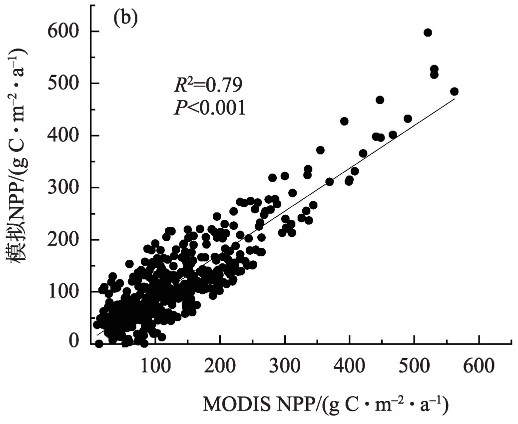


图2　CASA模型模拟NPP与实测NPP及MODIS NPP对比

Fig. 2　Comparison of CASA model simulated NPP with measured NPP and MODIS NPP

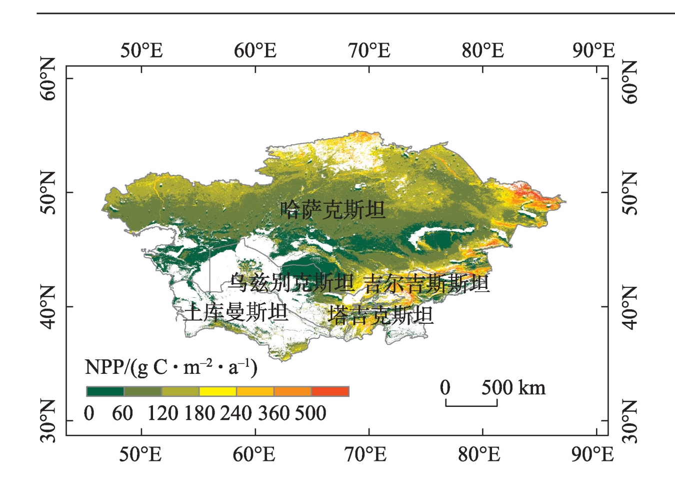


图3 2001—2019年中亚草地ANPP的平均空间分布

Fig. 3 Averaged spatial distribution of grassland ANPP in Central Asia from 2001 to 2019

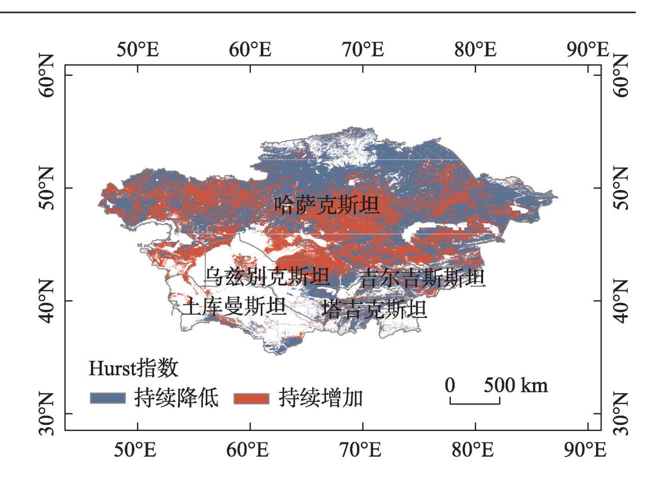


图5 2001—2019年中亚草地ANPP的趋势变化的持续性

Fig. 5 Sustainability of ANPP trend change in Central Asia grassland from 2001 to 2019

库曼斯坦两国境内荒漠为主要土地利用类型，草地面积仅占两国总面积的27%，两国的年均草地ANPP值相对偏小，仅为89.88 g C·m^{-2}·a^{-1}。

回归分析(图4)表明，2001—2019年ANPP增加区域的面积占中亚草地面积的60.4%，主要分布在哈萨克斯坦南部和东北部草原以及天山西麓地区；ANPP降低区域的面积占中亚草地面积的39.6%，主要分布在哈萨克斯坦西部和北部草原。超过80%的草地的ANPP变化趋势不显著。ANPP趋势通过显著性检验(P<0.05)的区域面积占中亚草地面积的18.6%，主要集中在哈萨克斯坦东南部四州，其中13.3%的区域草地ANPP显著增加，5.3%的区域草地ANPP显著降低。

2001—2019年中亚草地ANPP变化趋势持续性分析(Hurst指数)的结果表明(图5)，ANPP未来变化

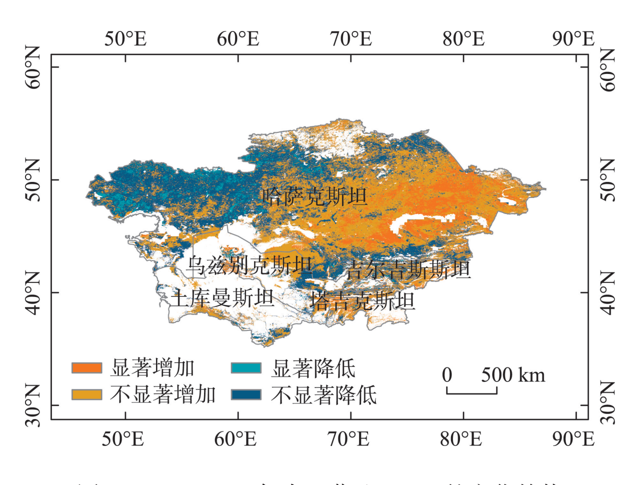


图4 2001—2019年中亚草地ANPP的变化趋势

Fig. 4 Change trend of ANPP in Central Asia grassland from 2001 to 2019

趋势与过去相同(H>0.5)的区域面积占中亚草地面积的40.2%，主要分布在哈萨克斯坦，ANPP未来变化趋势与过去相反(H<0.5)的区域面积占中亚草地面积的59.8%，主要分布在乌兹别克斯坦东南部以及哈萨克斯坦北部。

2001—2019年中亚地区草地的年均PNPP为466.89 g C·m^{-2}·a^{-1}(图6a)，中亚草地的平均ANPP的低值区面积(<300 g C·m^{-2}·a^{-1})占中亚地区草地面积的17.4%，主要分布在哈萨克斯坦的克孜勒奥尔达州和乌兹别克斯坦；高值区面积(>700 g C·m^{-2}·a^{-1})占中亚草地面积的7.5%，主要分布在塔吉克斯坦和哈萨克斯坦东部边境以及吉尔吉斯斯坦的山区。研究发现，中亚地区草地的PNPP的空间分布规律与ANPP高度一致。2001—2019年中亚草地的PNPP呈现增加趋势的区域面积占草地面积的31.8%(图6b)，主要分布在哈萨克斯坦的东部和塔吉克斯坦的山区，除此之外，大部分区域的PNPP呈现降低趋势，占草地面积的68.2%。整体来看，中亚草地PNPP的变化趋势并不显著，其中显著降低的区域占比仅为4.7%，主要分布在哈萨克斯坦的西北部。

2.3 中亚草地NPP变化的驱动因素

将气候变化和人类活动对草地NPP影响定义为6种情景(表1)，其中SANPP、SPNPP和SHNPP分别代表ANPP、PNPP和HNPP的斜率。

2001—2019年中亚草地ANPP增加的区域面积占比为60.4%(图7)。其中由气候变化导致的ANPP增加的区域面积占草地面积的16.0%，主要分布在

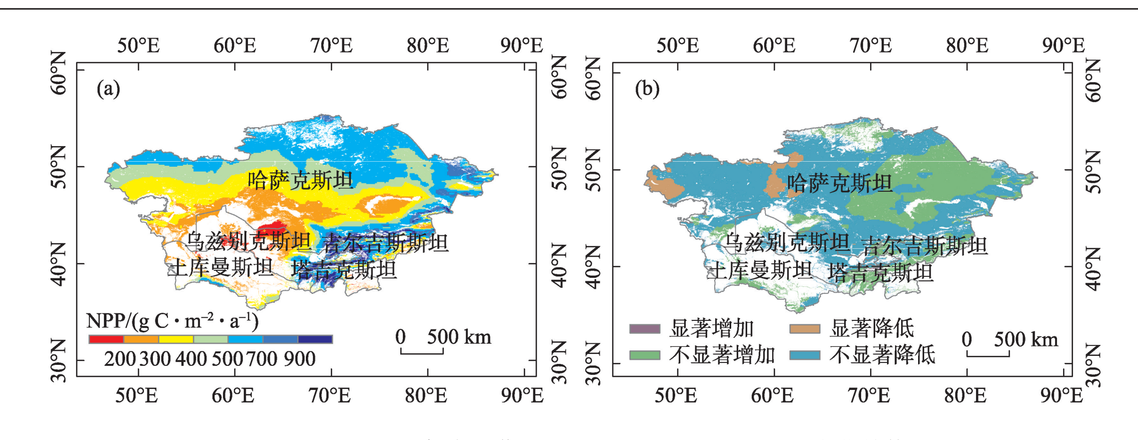


图6 2001—2019年中亚草地的平均PNPP以及PNPP的变化趋势

Fig. 6 Average PNPP of grassland in Central Asia and its change trend from 2001 to 2019

表1 评估中亚草地ANPP变化驱动因素的6种情景

Tab. 1 Six scenarios of evaluating the driving factors of ANPP change in Central Asia grassland

SANPP	情景	SPNPP	SHNPP	定义
SANPP>0	情景1(IDC)	+	+	气候变化导致草地ANPP增加
	情景2(IDH)	-	-	人为因素导致草地ANPP增加
	情景3(IDCH)	+	-	气候变化和人为因素共同导致草地ANPP增加
SANPP<0	情景4(DDC)	-	-	气候变化导致草地ANPP减少
	情景5(DDH)	+	+	人为因素导致草地ANPP减少
	情景6(DDCH)	-	+	气候变化和人为因素共同导致草地ANPP减少

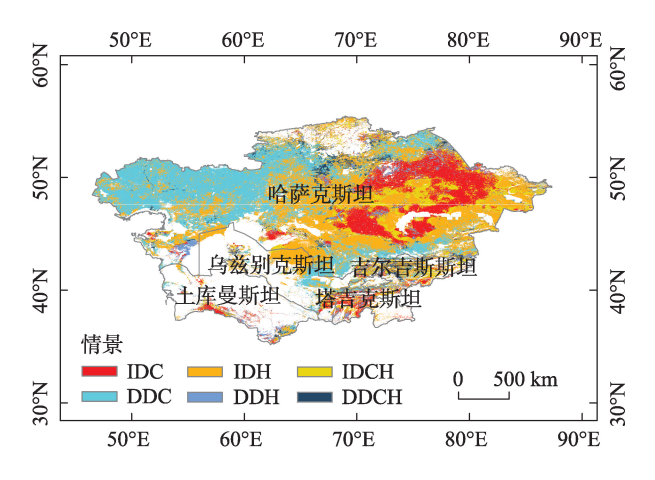


图7 气候变化和人类活动对中亚草地ANPP变化相对影响的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of relative impacts of climate change and human activities on grassland ANPP change in Central Asia

哈萨克斯坦东部地区和帕米尔高原的西部;而由人类活动导致ANPP增加的区域面积占比为33.4%,主要分布在哈萨克斯坦境内;气候变化和人类活动共同导致ANPP增加的区域面积占比为11.0%,主要分布在哈萨克斯坦东部地区和吉尔吉斯斯坦。2001—2019年中亚草地ANPP降低的区域面积占比为39.6%。其中由气候变化导致的ANPP降低的区域面积占草地面积的31.8%,主要分布在哈萨克斯坦的西部和北部草原;由人类活动导致ANPP降低的区域面积占比为4.8%,主要分布在哈萨克斯坦的西南部;由气候变化和人类活动共同导致的ANPP降低的区域面积占比仅为3.1%。因此,在中亚草地ANPP增加的区域,人类活动占主导地位;在中亚草地ANPP降低的区域,气候变化是主要驱动力。

为探究影响2001—2019年中亚草地ANPP变化的主要气候因子,本研究分别做了ANPP与降水(图8a)以及温度(图8b)的相关性分析。2001—2019年,除去天山山脉和帕米尔高原的部分地区,中亚绝大部分草地的ANPP与降水呈现正相关,占比达到96.4%,二者显著正相关的区域面积占中亚草地面积的67.8%。降水是影响中亚草地ANPP变化的主要气候因子,温度与中亚草地ANPP的变化关系不显著。

3 讨 论

2001—2019年,中亚地区草地ANPP均值为118.9 g C·m^{-2}·a^{-1},本研究结果小于Chen等[25]利用

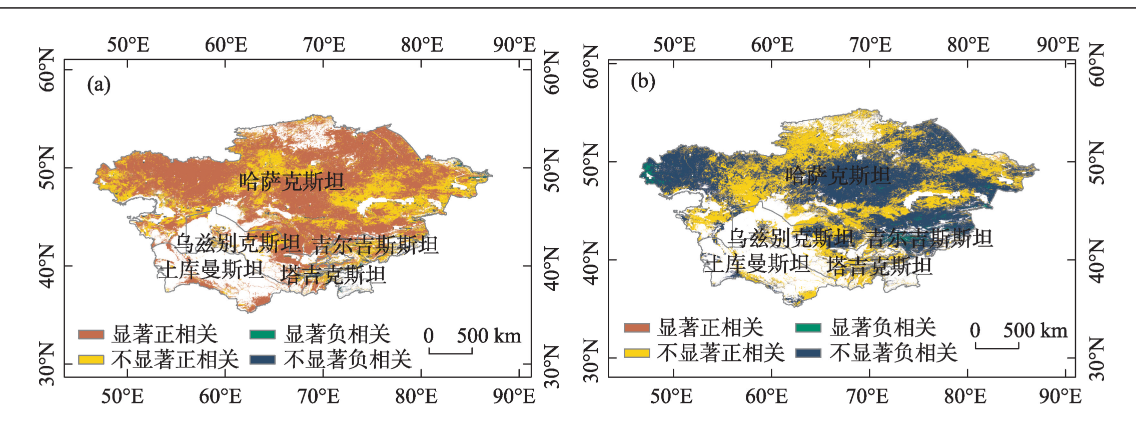


图8 2001—2019年中亚草地ANPP与年降水及年均温的相关性

Fig. 8 Correlation of ANPP with annual precipitation and annual mean temperature in Central Asia grassland from 2001 to 2019

CASA模型模拟的中亚五国及新疆草地生态系统的NPP(1982—2015年)。研究时段不同,研究区范围有所差异,采用不同数据源的NDVI、土地覆盖类型等数据,会造成模拟值间的差异。朱文泉等[26]研究也表明,对于不同研究区用于模型模拟的最大光能利用率也不同。不同的研究区以及不同的数据源所造成的研究结果差异,需要有实测数据加以佐证。本研究分别利用实测NPP和MODIS NPP对ANPP进行验证,二者与本研究模拟的ANPP都有较高的拟合度。另外,CASA模型模拟的NPP(2001—2019年)整体低于MODIS的NPP,这与刘洁等[27]的研究结论一致。

2001—2019年,中亚大部分地区的草地ANPP的未来变化趋势将与过去相反,表明大部分地区的草地ANPP在未来会有减少趋势,这可能是由于牲畜量的快速增长,会导致超载放牧的现象加剧,从而致使草地生产力降低[28]。平原地区的草地ANPP随纬度增加而呈现由南到北逐渐增加的趋势,平原到山地草地ANPP随海拔升高呈现明显的增加趋势,这与Chen等[25]的研究结果一致。塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦的山区的草地ANPP明显高于中亚其他地区,山区降水量高是其主要原因。

半干旱和干旱生态系统中的植被对气候变化极其敏感[29]。2001—2019年由气候变化导致中亚草地ANPP增加的区域面积占草地面积的16.0%;由气候变化导致草地ANPP降低的区域面积占草地面积的31.8%。本研究发现,降水是影响中亚草地ANPP的主要因素。相关研究表明,中亚草地NPP对降水变化比对气温变化更敏感[30]。降水在很大程度上决定了草地植被的生长。降水减少会降低草原植物的光合作用效率,抑制植物活动和有机质生产,最终降低草地生产力[31];反过来,降水增加可以提高半干旱和干旱生态系统中的土壤水分含量,从而提高草地生产力[32]。刘国华等[33]也认为,降水量增加可以改善土壤水分条件,同时提高土壤水分的有效性和土壤水分利用率,降低土壤水分胁迫,从而有利于草地植被生长。2001—2019年,由气候变化导致草地NPP降低的区域主要分布在哈萨克斯坦西北部和南部的部分地区,由气候变化导致NPP增加的区域主要分布在哈萨克斯坦东部的部分地区,这些区域年降水量的变化直接导致了ANPP的变化。另外,由于温度的升高导致草地植被气孔关闭,同时会伴随着潜在蒸散和水分胁迫增强,进而导致草地生产力降低[34],所以哈萨克斯坦西部边境存在温度升高显著影响草地NPP降低的现象。

人类活动是中亚草原净初级生产力动态变化的重要驱动力[35]。2001—2019年由人类活动导致中亚草地ANPP增加的区域面积占草地面积的33.4%,主要分布在哈萨克斯坦的东部。这是由于苏联解体后经济体制的变化,缓解了过度放牧,哈萨克斯坦的大量牧场被遗弃并转变为半自然草原[36]。同时耕地大量弃耕转变为草地,到2010年,哈萨克斯坦原有的耕地仍有58%被弃耕,大面积的农田处于闲置状态,已经转换为天然草地,导致草地生产力有所增加[37]。另外,2000年以后,由于政策改革和政府对农业的支持,哈萨克斯坦的农作物和畜牧业生产开始恢复,哈萨克斯坦政府实施农业多样化政策,以支持畜牧业生产,使得草地生产规范化[37],这同样也有利于草地植被生产力的增加。Han等[13]认为干旱地区合理的草地放牧制度可以有效地防

止中亚草原生态系统的退化,促进草地生产力的增加,有利于草地生态系统的可持续发展。相关研究表明,健康的草地状况可以有效地缓冲放牧和气候干扰,并能够维持较高的草地生产力和生物多样性,而不放牧并不一定能持续维持草地的健康状况[38],适度放牧也会促进草地生产力增加[39]。然而,不同放牧条件下草原净初级生产力和放牧之间的关系的机制仍需展开深入研究[40]。

本文研究2001—2019年中亚草地净初级生产力动态,时间尺度相对较短,空间尺度相对较大。今后研究需要获取更长时间序列的数据,着重研究小尺度区域,以求更加系统地掌握中亚草地的生产力的动态变化及驱动机制。

4 结 论

本研究基于CASA模型计算2001—2019年中亚地区草地的实际净初级生产力(ANPP),进而分析其时空动态趋势;通过定义不同的情景来分析人类活动和气候变化对草地ANPP的驱动机制,确定气候和人为因素对草地ANPP的影响,得出以下主要结论:

(1) 2001—2019年中亚地区草地的ANPP均值为118.9 g C·m^{-2}·a^{-1},变化范围为97.6~135.5 g C·m^{-2}·a^{-1}。草地ANPP在空间尺度上呈现从哈萨克斯坦南部到哈萨克斯坦北部、从低海拔地区到高海拔地区逐渐增加的规律。

(2) 2001—2019年中亚地区草地的ANPP呈现增加趋势的区域占比为60.4%,且超过80%的草地的ANPP变化趋势不显著,ANPP总体呈现不显著的增长趋势。接近60%的中亚草地的ANPP未来会呈现不显著的负向持续性的变化趋势。

(3) 2001—2019年中亚地区草地的PNPP均值为466.89 g C·m^{-2}·a^{-1},PNPP呈现降低趋势的区域占比为68.2%,且超过95%的草地的PNPP变化趋势不显著,PNPP总体呈现不显著的降低趋势。

(4) 2001—2019年由人类活动导致中亚草地ANPP增加的区域面积占草地面积的33.4%;由气候变化导致的ANPP降低的区域面积占草地面积的31.8%。在中亚草地ANPP增加的区域,人类活动占主导地位。但是,在中亚草地ANPP降低的区域,气候变化是主要驱动力。

(5) 2001—2019年中亚草地的ANPP与降水呈现显著正相关的区域占比达到67.8%,温度与中亚草地ANPP的变化并无显著关系。降水是影响中亚草地ANPP变化的主要气候因子。

参考文献(References):

[1] 李均力, 包安明, 陈曦, 等. 气候变化背景下的中亚资源与环境[M]. 北京: 气象出版社, 2017: 1, 79−81. [Li Junli, Bao Anming, Chen Xi, et al. Resources and Environment in Central Asia in the Context of Climate Change[M]. Beijing: Meteorological Press, 2017: 1, 79−81.]

[2] 梁倩, 光莹, 刘琼, 等. 新疆及周边中亚地区中亚低涡背景下云中液态水分布研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 72−78. [Liang Qian, Guang Ying, Liu Qiong, et al. Study on the distribution of liquid water in clouds under the background of Central Asian vortex in Xinjiang and its surrounding Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 72−78.]

[3] 胡广录, 赵文智, 王岗. 干旱荒漠区斑块状植被空间格局及其防沙效应研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(24): 7609−7616. [Hu Guanglu, Zhao Wenzhi, Wang Gang. Research progress on spatial pattern of patchy vegetation and its sand control effect in arid desert area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24): 7609−7616.]

[4] Hu Z Y, Zhang C, Hu Q, et al. Temperature changes in Central Asia from 1979 to 2011 based on multiple datasets[J]. Journal of Climate, 2014, 27(3): 1143−1167.

[5] Lioubimtseva E, Cole R, Adams J M, et al. Impacts of climate and land-cover changes in arid lands of Central Asia[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62(2): 285−308.

[6] Dehghan S, Salehnia N, Sayari N, et al. Prediction of meteorological drought in arid and semi-arid regions using PDSI and SDSM: A case study in Fars Province, Iran[J]. Journal of Arid Land, 2020, 12: 318−330.

[7] 刘春静, 张丽, 周宇, 等. 中国新疆及中亚五国干旱区草地覆盖度反演与分析[J]. 草业科学, 2016, 33(5): 861−870. [Liu Chunjing, Zhang Li, Zhou Yu, et al. Inversion and analysis of grassland coverage in arid areas of Xinjiang, China and five Central Asian countries[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(5): 861−870.]

[8] 周可法, 张清, 陈曦, 等. 中亚干旱区生态环境变化的特点和趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(增刊2): 133−139. [Zhou Kefa, Zhang Qing, Chen Xi, et al. Characteristics and trends of ecological environment changes in arid areas of Central Asia[J]. Chinese Science: Earth Sciences, 2006, 36(Suppl.2): 133−139.]

[9] 杨恕, 田宝. 中亚地区生态环境问题述评[J]. 东欧中亚研究, 2002(5): 51−55. [Yang Shu, Tian Bao. A review of eco-environmental problems in Central Asia[J]. Eastern European and Central Asian Studies, 2002(5): 51−55.]

[10] Liang T G, Feng Q S, Yu H, et al. Dynamics of natural vegetation on the Tibetan Plateau from past to future using a comprehensive and sequential classification system and remote sensing data[J]. Grassland Science, 2012, 58(4): 208−220.

[11] 辛晓平, 张保辉, 李刚, 等. 1982—2003年中国草地生物量时空格局变化研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1582-1592. [Xin Xiaoping, Zhang Baohui, Li Gang, et al. Study on spatio-temporal pattern change of grassland biomass in China from 1982 to 2003 [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(9): 1582-1592.]

[12] 刘纪远, 邵全琴, 樊江文. 三江源区草地生态系统综合评估指标体系[J]. 地理研究, 2009, 28(2): 273-283. [Liu Jiyuan, Shao Quanqin, Fan Jiangwen. Comprehensive evaluation index system of grassland ecosystem in the source area of the Three Rivers[J]. Geographical Research, 2009, 28(2): 273-283.]

[13] Han Q F, Luo G P, Li C F, et al. Simulated grazing effects on carbon emission in Central Asia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 216: 203-214.

[14] Roxburgh S H, Berry S L, Buckley T N, et al. What is NPP? Inconsistent accounting of respiratory fluxes in the definition of net primary production[J]. Functional Ecology, 2005, 19(3): 378-382.

[15] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982—1999年我国植被净第一性生产力及其时空变化[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(4): 563-569. [Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinghua. Net primary productivity and its spatio-temporal change of vegetation in China from 1982 to 1999[J]. Journal of Peking University(Natural Science Edition), 2001, 37(4): 563-569.]

[16] Gao Q Z, Zhu W Q, Schwartz M W, et al. Climatic change controls productivity variation in global grasslands[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 26958.

[17] Guo H, Bao A M, Liu T, et al. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966-2015[J]. Science of the Total Environment, 2018, 624: 1523-1538.

[18] Miao L J, Ye P L, He B, et al. Future climate impact on the desertification in the dry land Asia using AVHRR GIMMS NDVI3g data [J]. Remote Sensing, 2015, 7(4): 3863-3877.

[19] Zhou Y, Zhang L, Xiao J F, et al. Spatiotemporal transition of institutional and socioeconomic impacts on vegetation productivity in Central Asia over last three decades[J]. Science of the Total Environment, 2019, 658: 922-935.

[20] Chen T, Bao A M, Jiapaer G, et al. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982-2015[J]. Science of the Total Environment, 2019, 653(FEB.25): 1311-1325.

[21] Lioubimtseva E, Cole R, Adams J M, et al. Impacts of climate and land-cover changes in arid lands of Central Asia[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62(2): 285-308.

[22] 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 等. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1647-1657. [Chen Fahu, Huang Wei, Jin Liya, et al. Variation characteristics and spatial differences of precipitation in arid areas of Central Asia under the background of global warming[J]. Chinese Science: Geoscience, 2011, 41(11): 1647-1657.]

[23] 马安娜, 于贵瑞, 何念鹏, 等. 中国草地植被地上和地下生物量的关系分析[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 769-776. [Ma An'na, Yu Guirui, He Nianpeng, et al. Analysis on the relationship between aboveground and underground biomass of grassland vegetation in China[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(4): 769-776.]

[24] Chen B X, Zhang X Z, Tao J, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189-190: 11-18.

[25] Chen T, Tang G P, Yuan Y, et al. Unraveling the relative impacts of climate change and human activities on grassland productivity in Central Asia over last three decades[J]. Science of the Total Environment, 2020, 743, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020. 140649.

[26] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩. 中国典型植被最大光利用率模拟[J]. 科学通报, 2006, 51(6): 86-92. [Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, He Hao. Simulation of maximum light utilization efficiency of typical vegetation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(6): 86-92.]

[27] 刘洁, 孟宝平, 葛静, 等. 基于CASA模型和MODIS数据的甘南草地NPP时空动态变化研究[J]. 草业学报, 2019, 28(6): 19-32. [Liu Jie, Meng Baoping, Ge Jing, et al. Study on spatio-temporal dynamic changes of NPP in Gannan grassland based on CASA model and MODIS data[J]. Acta Prataculata Sinica, 2019, 28(6): 19-32.]

[28] 胡宁宁. 长期过度放牧致羊草个体"矮小化"的调控机制——基于氮代谢途径的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017. [Hu Ningning. Regulatory Mechanism of "Dwarfing" of *Leymus chinensis* Caused by Long-Term Overgrazing: A Study Based on Nitrogen Metabolic Pathway[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.]

[29] Lioubimtseva E. Climate change in arid environments: Revisiting the past to understand the future[J]. Progress in Physical Geography, 2004, 28(4): 502-530.

[30] Zhang C, Lu D S, Chen X, et al. The spatiotemporal patterns of vegetation coverage and biomass of the temperate deserts in Central Asia and their relationships with climate controls[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 175: 271-281.

[31] Gourdji S M, Sibley A M, Lobell D B. Global crop exposure to critical high temperatures in the reproductive period: Historical trends and future projections[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8 (2): 024041, doi: 10.1088/1748-9326/8/2/024041.

[32] Li C F, Zhang C, Luo G P, et al. Carbon stock and its responses to climate change in Central Asia[J]. Global Change Biology, 2015, 21(5): 1951-1967.

[33] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响[J]. 自然资源学报, 2001, 1(1): 71-78. [Liu Guohua, Fu Bojie. Impact of global climate change on forest ecosystem[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 1(1): 71-78.]

[34] 刘婵, 刘冰, 赵文智, 等. 中亚地区植被净初级生产力时空动态及其与气候因子关系[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 924-933. [Liu Chan, Liu Bing, Zhao Wenzhi, et al. Spatio-temporal dynamics of net primary productivity of vegetation in Central Asia

and its relationship with climatic factors[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 924–933.]

[35] Chen Y Z, Ju W M, Groisman P Y, et al. Quantitative assessment of carbon sequestration reduction induced by disturbances in temperate Eurasian steppe[J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(11): 115005, doi.org/10.1088/1748-9326/aa849b.

[36] Nora D, Karin F, David S. Land Reform and Farm Restructuring in Transition Countries: The Experience of Bulgaria, Moldova, Azerbaijan, and Kazakhstan[M]. Washington, D C: World Bank Publications, 2007.

[37] Kraemer R, Prishchepov A V, Müller D, et al. Long-term agricultural land-cover change and potential for cropland expansion in the former virgin lands area of Kazakhstan[J]. Econstor Open Access Articles, 2015, 10(5): 054012, doi: 10.1088/1748-9326/10/5/054012.

[38] 王明君, 韩国栋, 崔国文, 等. 放牧强度对草甸草原生产力和多样性的影响[J].生态学杂志, 2010, 29(5): 862–868. [Wang Mingjun, Han Guodong, Cui Guowen, et al. Effect of grazing intensity on productivity and diversity of meadow steppe[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(5): 862–868.]

[39] Mipam T, Zhong L L, Liu J Q, et al. Productive overcompensation of alpine meadows in response to yak grazing in the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 00925, doi.org/10.3389/fpls.2019.00925

[40] Frank D A, Kuns M M, Guido D R. Consumer control of grassland plant production[J]. Ecology, 2002, 83: 602–606.

Study on spatio-temporal dynamics and driving factors of NPP in Central Asian grassland

ZHANG Yunxin[1,2,3], HAO Haichao[4,5], FAN Lianlian[1], LI Yaoming[1], ZHANG Renping[6,7], LI Kaihui[1,3]

(1. Silk Road Green Development Research Center, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Bayinbrook Grassland Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Bayinbrook 841314, Xinjiang, China; 4. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 5. Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 6. College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 7. Key Laboratory of Oasis Ecology of Education Ministry, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

Abstract: Based on the CASA and Miami models, the net primary productivity (NPP) of five Central Asian countries (Kazakhstan, Tajikistan, Kyrgyzstan, Turkmenistan, and Uzbekistan) was calculated in this study. The purpose was to explore the Spatio-temporal dynamics and driving factors of NPP in Central Asian grassland from 2001 to 2019. The results showed that the average ANPP of grassland in Central Asia from 2001 to 2019 was 118.9 $g\ C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$. On the spatial scale, the ANPP of grassland in the plain area increased gradually from south to north with increasing latitude. In contrast, the ANPP of grassland from plain to mountain grassland increased with increasing altitude. On the temporal scale, the overall growth trend of ANPP was not significant, and the future change trend of grassland ANPP in approximately 60% of the region was opposite to that of the past. The trend was not significant in the region of Central Asia with increased grassland ANPP where human activities are dominant and with decreased grassland ANPP, with climate change as the main driving force. A significant positive correlation existed between ANPP and precipitation accounting for 67.8% , with no significant relationship between temperature and the change of ANPP in Central Asian grassland. Therefore, precipitation is the main climatic factor affecting the change of ANPP in Central Asian grassland.

Keywords: NPP; Central Asia; grassland; change trend; climate change; human activities